

PROCEDE D'EXAMEN RADIOLOGIQUE D'UN OBJET  
DESCRIPTION

Cette invention concerne un procédé  
5 d'examen radiologique multi-énergie d'un objet.

Les procédés radiologiques consistent à  
faire traverser un objet à étudier par un rayonnement  
pour en déduire la répartition de différentes  
catégories de matériaux, absorbant le rayonnement de  
10 façons différentes, dans cet objet. Une application  
très courante est l'ostéodensitométrie, où on recherche  
la masse et la densité des tissus osseux dans un  
patient en distinguant ces tissus des tissus mous.

Il est usuel d'utiliser un spectre de  
15 rayonnement large et à le diviser en bandes mesurées  
séparément par des canaux de mesure respectifs. Comme  
les coefficients d'absorption ou d'atténuation du  
rayonnement par l'une ou l'autre des catégories de  
tissu sont différents pour chacune des bandes, le  
20 problème théorique se ramène à la solution d'un système  
d'équations dont le nombre est égal à celui des bandes  
de mesure et qui comprennent chacune deux inconnues  
(les épaisseurs ou les masses traversées de tissus mous  
et osseux). La solution du problème devient possible  
25 après une calibration obtenue en faisant traverser par  
le rayonnement divers étalons dotés d'épaisseurs  
connues de matériaux aux propriétés d'absorption  
analogues à celles des matériaux de mesure, et  
notamment le plexiglas et l'hydroxyapatite pour simuler  
30 les tissus mous et les tissus osseux. On peut alors,  
calculer les paramètres mathématiques d'un modèle

reliant les mesures d'atténuation aux épaisseurs des matériaux.

On notera qu'en réalité le corps humain contient trois catégories principales de tissus : les  
5 tissus osseux, les tissus maigres et les tissus gras, mais qu'on n'en considère que deux en général à cause de difficultés à distinguer ces trois catégories dans les mesures, de sorte qu'on confond volontairement les  
10 tissus maigres et gras. D'autres procédés sont ensuite appliqués pour distinguer leurs proportions dans les tissus mous.

La largeur du spectre permet de disposer d'un nombre beaucoup plus grand de bandes de mesures qu'il ne serait nécessaire pour obtenir une solution,  
15 et de les employer toutes pour obtenir des résultats plus précis en exploitant toute l'information d'absorption obtenue. Dans l'article "Measurement of bone mineral using a multiple-energy x-ray absorptiometry", par J. Swanpalmer, R. Kullenberg, T.  
20 Hansson, Phys.Med.Biol, Vol 43, 1997:pp 379-387, où on dispose de 23 bandes de mesures et où on considère les trois catégories de tissus, il est proposé de combiner les groupes de mesures trois par trois de toutes les  
25 façons possibles pour obtenir 1771 ( $23 \times 22 \times 21 / 2 \times 3$ ) systèmes de trois équations à trois inconnues qui donnent autant de groupes de résultats. Il convient alors d'appliquer un critère de choix. Les auteurs conseillent de choisir comme résultat véridique celui qui est à la valeur moyenne, ou à la valeur médiane,  
30 pour le paramètre le plus important, qui peut être la masse osseuse traversée.

Contrairement à ce qu'on a conseillé plus haut, les auteurs considèrent les trois catégories de tissus. Cela ne met pas en question la validité de leur méthode, à condition d'exposer le patient à une  
 5 intensité d'irradiation beaucoup plus forte pour ramener les incertitudes des mesures à des proportions acceptables. Il serait d'ailleurs possible de modifier simplement leur méthode pour l'appliquer à des mesures sur deux tissus, ou plus généralement deux catégories  
 10 de matériaux, seulement. Toutefois, il subsiste le défaut que cette méthode ne tient pas compte du bruit sur les mesures et qu'elle conduit donc à des résultats bruités.

L'invention a pour objet un  
 15 perfectionnement de tels procédés par combinaison de résultats nombreux et comprend une amélioration du critère de choix des résultats. Plus précisément, elle concerne sous sa forme la plus générale un procédé d'examen radiologique d'un objet où sont considérées au  
 20 moins deux catégories de matériaux, comprenant : l'emploi d'un rayonnement à spectre large ; des mesures du rayonnement par bandes du spectre ; des expressions ( $\hat{M}$ ) d'épaisseurs ou de masses des deux catégories de matériaux traversées par le rayonnement, les  
 25 expressions ( $\hat{M}$ ) étant des fonctions d'au moins deux des mesures ( $mes_k$ ) et de coefficient ( $A$ ) ; et l'application d'un critère de choix parmi les expressions ( $\hat{M}$ ) pour en déduire une expression ( $\hat{M}_{finale}$ ) jugée véridique ; caractérisé en ce que le  
 30 critère de choix comprend une combinaison ( $f$ ) des expressions avec des facteurs de pondération ( $a$ ), et un

calcul de facteurs de pondération de manière que la combinaison ait un bruit minimal (variance minimale en langage mathématique) calculé d'après les bruits sur les mesures (variances sur les mesures).

5 L'invention sera maintenant décrite en référence aux figures :

- la figure 1 est une vue d'un spectre,
- la figure 2 est une répartition de résultats,
- 10 - et la figure 3 est un organigramme résumant l'invention, auquel on pourra se reporter dans toute la description qui suit.

L'atténuation du rayonnement peut être exprimée par une fonction des épaisseurs traversées de chacun des matériaux d'indices  $x$  et  $y$ , ou de leurs masses  $M$  (densités par unité de surface) dans la direction du rayonnement. Le spectre de mesures de la figure 1 est divisé en  $N$  bandes notées généralement par les indices  $i$  et  $j$ . Les atténuations varieront dans  
 15 chacune des bandes en raison de coefficients d'absorption variables pour les deux matériaux. Si nous appelons  $mes_i$  ou  $mes_j$  les mesures pour une bande d'énergie  $i$  ou  $j$ , les masses traversées  $M_x$  et  $M_y$  pourront chacune être exprimées aussi, par exemple, par  
 20 la formule générale  

$$\hat{M} = A_1 + A_2 \cdot mes_i + A_3 \cdot mes_j + A_4 \cdot mes_i^2 + A_5 \cdot mes_j^2 + A_6 \cdot mes_i \cdot mes_j$$
 les mesures considérées dans cet exemple étant des mesures d'atténuation, on aura pour chaque canal de mesure  $i$  (correspondant à une bande du spectre) la relation  $mes_i$   
 25  
 30  $= \ln \left( \frac{noi}{ni} \right)$  où  $noi$  est le nombre de photons arrivant sur l'objet et  $ni$  celui des photons ayant traversé l'objet.

Comme la non-linéarité des fonctions  $M_x$  et  $M_y$  en fonction des mesures est faible en pratique, on peut s'accommoder de cette fonction polynomiale du deuxième degré qui comprend six coefficients  $A_1$  à  $A_6$ . Le degré du polynôme peut être ajusté en fonction du problème ; Par exemple, pour l'analyse d'objets constitués de matériaux ayant des numéros atomiques plus élevés que celui des tissus biologiques, comme le contrôle non destructif pour l'examen d'un objet métallique. les mesures considérées dans cet exemple étant des mesures d'atténuation, on aura pour chaque canal de mesure  $i$  (correspondant à une bande du spectre) la relation  $mes_i = \ln (noi/ni)$  où  $noi$  est le nombre de photons arrivant sur l'objet et  $ni$  celui des photons ayant traversé l'objet.

Ces coefficients peuvent être trouvés dans une étape d'étalonnage à travers des étalons, appelés parfois fantômes ou cales dans l'art, et qui consistent en des pièces formées d'épaisseurs connues et différentes entre elles de matériaux simulant, par leurs propriétés d'atténuation, les matériaux de l'objet qui sera effectivement à mesurer. Chacun des étalons est donc soumis à une irradiation par le rayonnement pendant une longue durée qui permet de réduire l'influence du bruit sur les mesures. Le spectre mesuré pour chacun des étalons donne encore  $N$  mesures résultant de la décomposition du spectre en autant de bandes. En combinant maintenant deux séries de mesures  $i$  et  $j$  prises pour deux bandes et pour chacun des étalons, on recherche les coefficients  $A$  pour ajuster les fonctions  $M_x$  et  $M_y$  aux mesures. Dans le cas présent, où il y a six coefficients  $A$  pour chacune

des deux fonctions, et où on considère les combinaisons de deux bandes de mesure, les mesures pour chacune des bandes devront, pour fournir une solution unique, porter sur six étalons. Des étalons plus nombreux  
 5 pourront aussi être utilisés pour améliorer la précision sur la solution. Une minimisation de fonction d'erreur sera alors appliquée.

Cette détermination des coefficients A est répétée pour diverses combinaisons de paires de  
 10 mesures. Il en était encore ainsi dans l'article antérieur mentionné plus haut ; cependant, on a constaté qu'il était inutile d'effectuer toutes les combinaisons, au nombre de  $\frac{N \times (N-1)}{2}$ , pour exploiter complètement les mesures et que (N-1) combinaison  
 15 étaient en réalité suffisantes pour recueillir toute l'information.

Une façon préférée de procéder consiste à choisir au départ la bande de mesures qui est la moins bruitée (par exemple celle qui a le signal n - le  
 20 nombre de photons à la réception- le plus important) et à l'associer successivement à chacune des autres bandes de mesures pour les combinaisons. On obtient finalement (N-1) estimations des deux fonctions  $M_x$  et  $M_y$ , qu'on note  $\hat{M}_1, \hat{M}_2, \dots, \hat{M}_{N-1}$  pour chacune de ces deux fonctions.

25 A ce stade du procédé, les fonctions  $M_x$  et  $M_y$ , représentatives des longueurs traversées de deux matériaux représentatifs des tissus osseux et des tissus mous, pourront être converties en fonction  $M_u$ ,  $M_v$  et  $M_w$  représentatives des longueurs équivalentes  
 30 traversées des tissus osseux, des tissus maigres et des

tissus gras en combinant linéairement  $M_x$  et  $M_y$  de trois façons différentes déterminées par l'expérience. Ce procédé de conversion est indépendant de l'invention, déjà connu dans l'art.

5 Comme il n'y a pas de raison de préférer l'une ou l'autre de ces estimations  $\hat{M}$ , un critère de choix doit être appliqué pour obtenir l'estimation  $\hat{M}_{\text{finale}}$  qui sera jugée véridique. Dans l'article antérieur, une des expressions obtenues était  
 10 directement sélectionnée d'après un critère de classement (le résultat médian) ou de moyenne des valeurs prises par les expressions pour un des résultats. Dans l'invention, les expressions  $\hat{M}$  seront combinées, par exemple linéairement, d'après la formule  
 15  $\hat{M}_{\text{finale}} = (a_1 \hat{M}_1) + (a_2 \hat{M}_2) + \dots + (a_{N-1} \hat{M}_{N-1})$  tout en minimisant le bruit ; les coefficients  $a_1$ , etc. ont une somme égale à l'unité ( $a_1 + a_2 + \dots + a_{N-1} = 1$ ).

Pour chaque canal de mesure, le bruit sur le nombre de photons suit une loi statistique de  
 20 Poisson, dont le résultat est indépendant pour chacun des canaux. La matrice de covariance des  $N-1$  résultats peut être exprimée d'après la formule

$$\Gamma_{ij} = \sum_{k=1}^{N-1} \frac{\partial \hat{M}_i}{\partial \text{mes}_k} \frac{\partial \hat{M}_j}{\partial \text{mes}_k} \frac{1}{N_k}.$$

La variance sur la combinaison linéaire  
 25 donnant  $\hat{M}_{\text{finale}}$  s'exprime par la formule  $f = (a_1, \dots, a_{N-1}) \cdot \Gamma \cdot (a_1, \dots, a_{N-1})$  ; cette quantité  $f$  atteint une valeur optimale quand sa dérivée selon toutes les variables

est nulle, c'est-à-dire que l'influence du bruit est

$$\text{minimisée, soit : } \begin{cases} \partial f / \partial a_1 = 0 \\ \partial f / \partial a_2 = 0 \\ \dots \\ \partial f / \partial a_{N-1} = 0 \end{cases}$$

La résolution numérique de ce système  
5 fournit les coefficients  $a_1$ ,  $a_2$ , etc et  $\hat{M}$  finale,  
c'est-à-dire les masses traversées des deux catégories  
de matériaux.

Ce sont ces opérations qui sont accomplies  
dans l'invention ; il est important de remarquer que  
10 les mesures ( $mes_k$ ) employées dans la formule donnant  $\Gamma_{ij}$   
et ensuite sont les mesures effectuées à travers  
l'objet à étudier lui-même, mais pas celles qui ont été  
faites à l'étalonnage pour déterminer les coefficients  
A des fonctions  $\hat{M}$ .

15 L'invention permet d'échapper au dilemme de  
procédés antérieurs dans lesquels on renonçait à une  
partie des énergies de mesure ou au contraire on  
acceptait des mesures peu distinctes : elle utilise en  
effet tout le spectre, mais en le divisant en bandes  
20 assez nombreuses pour que la mesure de chacune puisse  
être comparée de façon utile à d'autres mesures, faites  
sur des bandes éloignées. Elle permet ainsi, entre  
autres avantages, d'étudier aussi bien des organismes  
maigres que gras.

25 Enfin, l'invention peut être généralisée à  
un nombre de matériaux plus grand que deux, ce qui peut  
être intéressant notamment pour les procédés d'imagerie  
à produit de contraste, où trois variables doivent être

considérées ou pour contrôle des bagages (recherche d'explosifs) ; et elle peut être appliquée en considérant des combinaisons autres que linéaires des fonctions  $\hat{M}$ .

5 Des application de l'invention sont :

. l'ostéodensitométrie

- obtention de la densité de masse osseuse

- obtention de la composition corporelle (masse grasse, masse maigre)

15 . le contrôle agro-alimentaire, par exemple la détection de fragments d'os dans de la viande ou la détection de morceaux de verres dans des plats cuisinés,

. le contrôle des bagages : recherche d'explosifs, de produits illicites (armes, aliments, drogue...)

## REVENDICATIONS

1) Procédé d'examen radiologique d'un objet où sont considérées au moins deux catégories de matériaux, comprenant : l'emploi d'un rayonnement à spectre large ; des mesures du rayonnement par bandes du spectre ; des expressions ( $\hat{M}$ ) d'épaisseurs ou de masses des deux catégories de matériaux traversées par le rayonnement, les expressions ( $\hat{M}$ ) étant des fonctions d'au moins deux des mesures ( $mes_k$ ) et de coefficients ( $A$ ) ; et l'application d'un critère de choix parmi les expressions ( $\hat{M}$ ) pour en déduire une expression ( $\hat{M}_{finale}$ ) jugée véridique ; caractérisé en ce que le critère de choix comprend une combinaison ( $f$ ) des expressions avec des facteurs de pondération ( $a$ ), et un calcul des facteurs de pondération de manière que la combinaison ait un bruit minimal calculé d'après un bruit sur les mesures.

2) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la combinaison ( $f$ ) des expressions est linéaire.

3) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la variation de la combinaison est calculée avec une matrice de covariance ( $\Gamma_{ij}$ ) des expressions ( $\hat{M}$ ).

4) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les expressions ( $\hat{M}$ ) sont en nombre égal à celui des bandes, moins un, et établies toujours avec une des bandes ( $i_0$ ) et, respectivement, chacune des autres bandes.

5) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les coefficients (A) sont déterminés à une étape préalable de calibration.

6) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il est appliqué à l'ostéodensitométrie.

7) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il est appliqué à des contrôles agro-alimentaires.

8) Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce qu'il est appliqué au contrôle de bagages.

### ABRÉGÉ DESCRIPTIF

L'invention concerne un procédé d'examen radiologique d'un objet où sont considérées deux catégories de matériaux, comprenant : l'emploi d'un rayonnement à spectre large ; des mesures du rayonnement par bandes du spectre ; des expressions ( $\hat{M}$ ) d'épaisseurs ou de masses des deux catégories de matériaux traversées par le rayonnement, les expressions ( $\hat{M}$ ) étant des fonctions d'au moins deux des mesures ( $mes_k$ ) et de coefficients ( $A$ ) ; et l'application d'un critère de choix parmi les expressions ( $\hat{M}$ ) pour en déduire une expression ( $\hat{M}_{finale}$ ) jugée véridique ; caractérisé en ce que le critère de choix comprend une combinaison ( $f$ ) des expressions avec des facteurs de pondération ( $a$ ), et un calcul des facteurs de pondération de manière que la combinaison ait une variation minimale d'après des variations des mesures.

20

Figure 3.